

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Levin, M.I.

Automatische Regelung der Kühlwassertemperatur von Dieselmotoren auf Binnenschiffen

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schifffahrt
Schriftenreihe

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105918>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Levin, M.I. (1969): Automatische Regelung der Kühlwassertemperatur von Dieselmotoren auf Binnenschiffen. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schifffahrt Schriftenreihe 15. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 106-129.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Automatische Regelung der Kühlwassertemperatur
von Dieselmotoren auf Binnenschiffen

Kand. d. techn. Wiss. M.I. Levin

Zentrales Forschungsinstitut für Dieselmotoren
"CNIDI" , Leningrad

Manuskripteingang März 1969

1. Einleitung

Die automatische Regelung der Kühlwassertemperatur stellt ein aktuelles Problem dar. Die Gewährleistung optimaler Betriebstemperaturen im Kühlsystem der Dieselmotoren ergibt folgende Vorteile:

a) Eine Senkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs.

Als Erläuterung hierfür kann die folgende Tabelle dienen, die nach den Resultaten der im Institut "CNIDI" für kleine Schiffsdieselmotoren durchgeführten Prüfungen aufgestellt wurde. Hierin sind die Einsparungen je PSh bei verschiedener Belastung ausgewiesen, die beim Übergang auf den Betrieb mit einer Temperatur des aus dem Motor austretenden Kühlwassers im Bereich von 81 ... 84 °C anstelle der früheren Kühlwassertemperatur von 55 ... 60 °C erzielt werden.

Belastung [%]:	25	50	75	100	110
Einsparung [g/PSh]:	13	12	12	10	6,5

Diese Kenngrößen sind besonders bei Dieselmotoren kleinerer Dimensionen sehr wesentlich.

b) Ein verringerter Verschleiß bei den Zylinderlaufbuchsen.

Viele Forschungen haben die Tatsache einer Minderung des Verschleißes auf die Hälfte bis ein Drittel des früheren Wertes beim Übergang auf eine Austrittstemperatur des Kühlwassers von 75 ... 85 °C nachgewiesen.

c) Eine Verringerung des Einflusses der Kavitation und Erosion.

Die optimalen Temperaturgrenzen, innerhalb derer die geringste Zerstörung der umspülten Oberflächen der Zylinderlaufbuchse und des Zylinderblockes durch Kavitation und Erosion beobachtet werden, liegen, wie es die Untersuchungen gezeigt haben, im Bereich von 70 ... 85 °C.

d) Eine Erleichterung der Arbeit des Bedienungspersonals bei der Einhaltung der normalen Betriebsbedingungen des Dieselmotors.

Alle modernen Schiffsdieselmotorenanlagen, vor allem die auf Binnenschiffen, werden mit Systemen zur automatischen Regelung der Kühlwassertemperatur ausgerüstet.

2. Kühlsysteme und Klassifizierung der Verfahren zur Regelung der Kühlwassertemperatur

Auf Binnenschiffen wurden bisher zwei Kühlsysteme verwendet, und zwar Systeme mit offenem und mit geschlossenem Kreislauf. Beim offenen System entnimmt die Kühlwasserpumpe Wasser von außenbords, pumpt es durch den Dieselmotor und gibt es dann wieder nach außenbords. Bei geschlossenen Systemen gibt es einen Umwälzkreislauf mit einem darin eingebauten Wärmeaustauscher. Hierbei wird neben dem inneren Kreislauf für die Zirkulation von Frischwasser ein äußeres offenes System für die Zirkulation von Außenbordwasser zum Kühlen des Wärmeaustauschers verwendet.

Die Praxis hat gezeigt, daß die Regelung der Kühlwassertemperatur nach einem der drei folgenden Verfahren vorgenommen werden kann:

1. Drosselungsverfahren (Bild 1,a), bei dem das Stellglied des Regelsystems den Wasserdurchfluß durch den Dieselmotor in Abhängigkeit von der Temperatur vermindert oder erhöht.
2. Überlaufverfahren (Bild 1,b), bei dem das Stellglied des Regelsystems den aus dem Dieselmotor kommenden Wasserstrom steuert und die Wassermenge in den Teil, der durch den Wärmeaustauscher geht, und den anderen Teil, der als Überlauf zurück in den Dieselmotor geleitet wird, aufteilt.
3. Umleitungsverfahren (Bild 1,c), bei dem das Stellglied des Regelsystems das Außenbordwasser steuert und davon je nach Bedarf eine größere oder kleinere Menge in den Wärmeaustauscher leitet.

3. Grundsätze der Regelung

Objekt der Regelung ist das Kühlsystem des Dieselmotors. Die Wärmezufuhr in das Kühlsystem kann durch die Funktion $q_m = f(t_r)$ beschrieben werden, wobei mit t_r die zu regulierende Temperatur (die Austrittstemperatur des Kühlwassers aus dem Dieselmotor in Grad Celsius) bezeichnet ist. Wie viele Untersuchungen zeigen, ist diese Funktion für Viertaktmotoren linear:

$$q_m = (A - B) t_r \quad (1)$$

Bei Zweitaktmotoren ist diese Funktion nicht linear (die Kurve hat eine absteigende Form).

Die Ableitung der Wärme aus dem Kühlsystem erfolgt ebenfalls nach einer linearen Funktion:

$$q_a = D t_r - C, \quad (2)$$

was sich aus der einfachen Gleichung der Wärmebilanz ergibt:

$$\dot{q}_a = c G_o (t_r - t_e). \quad (3)$$

Hierbei sind $D = c G_o$ und $C = c G_o t_e$

Es bedeuten:

G_o = Masse des durch den Dieselmotor strömenden Wassers

c = spezifische Wärme des Wassers

t_e = Eintrittstemperatur des in den Dieselmotor kommenden Wassers in Grad Celsius.

Die Abstimmung der Kenngrößen für die Zuführung und Ableitung der Wärme ist in Bild 2 dargestellt. Der Schnittpunkt entspricht der stabilisierten Temperatur (t_{rs}). Wenn diese Temperatur bei allen Belastungsstufen, d.h. für die gesamte Schar der Funktionen $q_m = f(t_{rs})$, unverändert beibehalten werden soll ($t_{rs} = \text{const}$) muß der Regler die Wärmeableitung so steuern, daß bei neuen Be-

lastungsbedingungen der Schnittpunkt der Kennlinien nach wie vor dem Punkt t_{rs} entspricht. Der Wärmeregler muß demnach die Kennlinie der Wärmeableitung entweder äquidistant zu sich selbst übertragen (Kennlinie q_{a2a} in Bild 2) oder diese um den Punkt "O" drehen (Kennlinie q_{a2b} in Bild 2). Im ersteren Fall muß die Einwirkung auf t_e erfolgen, d.h., es muß nur der Beiwert c in der Gleichung (3) geändert werden; im zweiten Fall muß eine Einwirkung auf den Wasserdurchfluß G_o erfolgen (Änderung sowohl des Beiwertes C als auch des Beiwertes D).

Damit ergeben sich zwei Möglichkeiten der Regelung - die erste durch Einwirkung auf t_e (hierzu gehören das Überlauf- und das Umleitungsverfahren) und die zweite durch Einwirkung auf G_o (Drosselungsverfahren).

4. Statische Forderungen an Systeme der automatischen Regelung der Kühlwassertemperatur "SART" bei Dieselmotoren

Das am meisten verbreitete Regelungssystem bei Dieselmotorenanlagen der Binnenschiffe ist das Überlaufverfahren, da Dieselmotoren mit kleiner und mittlerer Leistung ein bequemes Einbauen im Frischwasserkreislauf gestatten. Außerdem ist das Überlaufverfahren auch bei offenen Kühlsystemen anwendbar. Das Umleitungsverfahren wird seltener angetroffen, während das Drosselungsverfahren bei der automatischen Regelung der Kühlwassertemperatur überhaupt nicht angewendet wird, weil bei Anwendung dieses Verfahrens die Kühlbedingungen des Dieselmotors erheblich verschlechtert werden.

Sowohl für das Überlauf- als auch für das Umleitungsverfahren können folgende statische Forderungen gestellt werden:

- Das System zur automatischen Regelung der Temperatur "SART" muß bei allen Laststufen und allen möglichen Temperaturänderungen des Außenbordwassers die Einhaltung der Austrittstemperatur des Kühlwassers aus dem Dieselmotor im Bereich einer Ungleichmäßigkeitszone (eines statischen Gesamtfehlers) von höchstens 12 grd gewährleisten.

- Das Stellglied des Wärmereglers muß die Einhaltung der Kühlwassertemperatur im Bereich von 75 ... 85 °C (bei geschlossenen Kühlsystemen) bzw. von 45 ... 55 °C (bei offenen Kühlsystemen) ermöglichen.

5. Besonderheiten der Statik des Regelsystems "SART" für Dieselmotoren

Das Objekt

Für jeden Dieselmotor ist es wichtig, folgende statische Beziehungen zu untersuchen:

a) Übertragungskennlinien

$$Y_o = f(\mu) - \text{siehe folgendes Bild -}$$

$$Y_o = f(X_o)$$

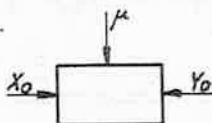
b) Gesetz der Reglereinwirkung

$$X_o = f(\mu)$$

$$Y_o = \text{Austrittscoordinate [} ^\circ\text{C]}$$

$$X_o = \text{Eintrittscoordinate [} ^\circ\text{C]}$$

$$\mu = \text{Koordinate der Durchflußmenge}$$



Die unter a) aufgeführten Kennlinien sind für die Überprüfung der Funktionen des Reglers wichtig, während die unter b) genannte Funktion für die Auslegung des Stellgliedes von Bedeutung ist.

Wir wollen die erwähnten Kennlinien für das am meisten verbreitete Überlaufverfahren betrachten.

a) Übertragungskennlinien

In diesem Falle können die erforderlichen Beziehungen aus folgenden statischen Relationen abgeleitet werden:

$$\text{Für } Y_0 = f(\mu)$$

Aus der bekannten Beziehung:

$$q_m = c g G_0 (t_r - t_x) \quad (4)$$

Bei $X_0 = g = \text{const}$ ergibt sich die folgende uns interessierende Funktion:

$$t_r = K_0 \mu q_m + 1 \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

g Koordinate der Regeleinwirkung: $g = \frac{G_r}{G}$ gibt das Verhältnis der Rückflußmenge des Wassers (G_r)⁰ zum Gesamtdurchfluß des Wasser (G_0) an

t_x Temperatur des herangeführten Außenbordwasser [°C]

$K_0 \mu = \frac{1}{c G_0} = \text{const}$ und $1 = t_x = \text{const}$ (für offene Kühlsysteme).

Die Beziehung ist linear. Mit $K_0 \mu$ ist der Übertragungskoeffizient bezeichnet.

Für $Y_0 = f(X_0)$ (bei offenen Kühlsystemen) aus der Gleichung (4), unter der Bedingung, daß

$$g = \text{variabel und } q_m = \text{const.}$$

Bei Lösung der Gleichung nach t_r (Y_0) erhalten wir die Beziehung $t_r = f(g)$ bei $q_m = \text{const}$ in folgender Form:

$$t_r = \frac{q_m}{c G_0 g} + t_x, \quad (6)$$

was eine Hyperbelschar darstellt, mit dem Parameter $q_m = \text{const}$ (d.h. für jede Laststufe eine eigene Kennlinie).

Eine Linearisierung ist nur in lokalem Sinne möglich (siehe Bild 3a).

b) Statisches Gesetz der Reglereinwirkung

Die uns interessierende Kennlinie $g = f(q_m)$ kann hier aus folgender Gleichung ermittelt werden:

$$q_m = cG_o \Delta t_g = cG_r (t_r - t_X),$$

wobei mit Δt_g das Temperaturgefälle im Motor bezeichnet wird:

$$(\Delta t_g = t_{\text{austr}} - t_{\text{eintr}})$$

Wenn Δt_g als Lastkoordinate angenommen wird, was für das Überlaufverfahren bei $G_o = \text{const}$ durchaus zulässig ist

$$(q_m = cG_o \Delta t_g \text{ und } \Delta t_g = a q_m),$$

wird die Gleichung

$$g = \frac{\Delta t_g}{t_r - t_X} \quad (7)$$

die Kennlinie des statischen Regelungsgesetzes nach dem Überlaufverfahren darstellen. Bei Berücksichtigung des Regelbereichs nach t_r ist hierbei

$$t_{\text{rxx}} \leq t_r \leq t_{\text{rob.}}$$

Hierin sind t_{rxx} die untere Grenze des Regelbereichs (Austrittstemperatur des Kühlwassers bei Leerlauf) und t_{rob} die obere Grenze des Regelbereichs (Austrittstemperatur des Kühlwassers bei Vollast). Danach können die Grenzwerte für g berechnet werden:

$$g_{\text{xx}} = \frac{\Delta t_{\text{gxx}}}{t_{\text{rxx}} - t_X} \quad \text{für die Laststufe xx}$$

und

$$g_{\text{ob}} = \frac{\Delta t_{\text{gob}}}{t_{\text{rob}} - t_X} \quad \text{für Vollast.}$$

Die Größe t_X wird für ein offenes Kühlsystem als konstant angenommen. Im geschlossenen Kühlsystem ist t_X abhängig von G_X und von den Bedingungen der Wärmeableitung am Kühler. Zur Bestimmung der Größe t_X muß die Kennlinie des Wärmeaustauschers vorliegen.

Besonders einfach lassen sich die Berechnungen mittels graphischer Verfahren durchführen (Bild 3b). Die Kennlinien (7) können als eine Schar von Geraden dargestellt werden, bei denen als Parameter t_X genommen wird.

Mit Hilfe der Kennlinienschar $g = f(\Delta t_g)$ können Berechnungen für offene Kühlsysteme und Voreinschätzungen von ε_{xx} und ε_{ob} für geschlossene Kühlsysteme vorgenommen werden.

Im Ergebnis wird es möglich, nach den Kennlinien des statischen Regelungsgesetzes den erforderlichen Drosselungsbereich des Stellgliedes des Regelsystems

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{ob} - \varepsilon_{xx}$$

und demzufolge auch den erforderlichen Arbeitshub des Ventil- oder Schiebersystems des Stellgliedes zu ermitteln. Aus der Formel (7) ergibt sich außerdem, daß die erforderliche Kennlinie des Stellgliedes

$$g = f(h) \tag{8}$$

linear sein muß, denn aus Formel (7) ergibt sich

$$g = A \Delta t_g$$

h = Hub des Stellgliedes

Das System

Nach dem statischen Gesetz der Reglereinwirkung ist bei $t_X = \text{variabel}$ zur Einhaltung von $t_r = \text{const}$ bei Änderung von Δt_m die Einstellung der Größe g durch den Regler erforderlich, die jedoch sowohl von Δt_m als auch von t_X abhängig ist. Da bei einem proportionalen Regler die Versetzung des Stellgliedes

eine eindeutige Beziehung zu t_r ($\Delta h = K_r \Delta t_r$) aufweist, wird das System eine Schar statischer Kennlinien enthalten (Bild 3).

Hierbei muß der vorgegebene Regelbereich Δt_r alle Teilbereiche enthalten Δt_{r1} (s. Bild 3b).

Ausgehend von den technischen Forderungen scheint es zweckmäßig, die Kühlsysteme der Dieselmotoren mit Proportional-Wärmerreglern als den billigsten und konstruktiv einfachsten Geräten auszurüsten.

Hierbei muß der Drosselungsbereich des Stellgliedes (sein Hub) proportional von der zu regelnden Temperatur ($\Delta h = K_r \Delta t_r$) abhängig sein. Die statischen Grenzen des Reglers müssen im Bereich von 10 grd liegen.

Das Stellglied muß ausgehend vom statischen Gesetz der Reglereinwirkung gewählt werden. Die Stellglieder werden als Ein- und als Zweiventil-Stellglieder (im Dreiwegengehäuse) unterteilt.

Die statische Kennlinie des Einventil-Stellgliedes (Bild 4a) weist auf die Möglichkeit seiner Verwendung bei $g = 0 \dots 0,5$ hin. Die statische Kennlinie des Zweiventil-Stellgliedes (Bild 4b) gestattet eine Regelung bei $g = 0 \dots 1$. Hierbei ist jedoch auf die Größe der passiven Zone (h_{pz}) zu achten, die auf einen Mindestwert verringert werden muß (bei annehmbaren Werten des hydraulischen Widerstandes).

Anderenfalls wird der statische Regelfehler künstlich vergrößert und eine wesentliche Abweichung von der Linearität eingebracht, die sich auf die Dynamik des Systems auswirken kann.

7. Erfahrungen beim Einstellen der Statik des Temperaturregelsystems "SART"

Es scheint zweckmäßig, einige praktische Beispiele zu behandeln, die auf die Wichtigkeit richtiger Vorstellungen über die

statischen Besonderheiten dieser Systeme hinweisen.

a) Richtiges Einstellen des Regelventils im Durchflußschema

In Bild 5 ist das Schema eines Kühlsystems eines Dieselmotors für Binnenschiffe dargestellt. Das Kühlsystem ist geschlossen; die Regelung erfolgt nach dem Überlaufverfahren. Das hier verwendete Einventil-Thermostat ist jedoch so eingestellt, daß das Ventil den Überlaufstrom steuert, während der Wasserstrom zum Kühler nicht regelbar ist.

Dieses steht in Widerspruch zu den Forderungen des statischen Gesetzes der Reglereinwirkung. Der Regelbereich erreicht hier 32 grd. Bei richtigem Einstellen des Wärmereglers (das Ventil steuert den Wasserstrom zum Kühler) nach der linearen statischen Kennlinie des Stellgliedes konnte diese Zone bis auf 4,5 grd vermindert werden.

b) Typenwahl des Stellgliedes

Bei einem der Dieselmotoren, die für den Hauptantrieb auf Binnenschiffen verwendet wurden, wurde ein Zweiventil-Wärmeregler eingesetzt (Bild 6a). Die Berechnung der Größe g nach dem statischen Gesetz hat jedoch gezeigt, daß ein Austausch gegen den einfacheren und billigeren Einventil-Wärmeregler (Bild 6b) möglich ist. Wie aus dem Vergleich der Darstellungen in Bild 7a und 7b ersichtlich, hat sich hierbei der statische Fehler sogar verringert ($\sigma_{st} = 4,8$ grd anstelle von 6 grd).

c) Verbesserung der statischen Kennlinie des Stellgliedes

Der für Dieselmotoren des Typs 25/34 auf Binnenschiffen verwendete Wärmeregler (Überlaufverfahren) ergab eine Regelung mit einem statischen Fehler von etwa 17 grd (siehe Darstellung in Bild 8a). Bei der Untersuchung dieses Falles erwies sich, daß das Stellglied hier eine statische Kennlinie mit einer großen passiven Zone aufwies. Durch konstruktive Maßnahmen konnte die Kennlinie verbessert und praktisch linear gemacht werden. Der Regelungsverlauf wurde wesentlich günstiger (siehe Bild 8b) und der statische Fehler betrug nur 3 grd.

8. Probleme der Dynamik des Wärmeregelungssystems "SART" für Dieselmotoren

Bei der Projektierung und Einregulierung der "SART"-Systeme für Dieselmotoren müssen ebenfalls die dynamischen Erscheinungen berücksichtigt werden.

Besonderheiten der Dynamik des Objekts

Vor allem muß genau definiert werden, was das Objekt darstellt. Bei der Regelung der Kühlwassertemperatur ist es das gesamte Fassungsvermögen des Kühlsystems. Theoretisch und experimentell ist festgestellt worden, daß die dynamischen Eigenschaften des Kühlsystems gesondert für jede Leitung - die Zufluß- (I) und die Reglerleitung (II) - betrachtet werden müssen.

Mit einer für die Dieselmotoren auf Binnenschiffen genügender Genauigkeit kann angenommen werden, daß als Funktionen der Übergangsübertragung bei beiden Leitungen folgende Exponenten auftreten:

$$J_{OI} = K_O \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{a\mu}}} \right)$$

und

$$J_{OII} = K_O g \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{ag}}} \right). \quad (9)$$

Hierbei haben die Zeitkonstanten $T_{a\mu}$ und T_{ag} verschiedene Werte.

Durch besonders angelegte Versuche wurde festgestellt, daß für das Temperaturregelungssystem "SART" beim Überlaufverfahren $T_{a\mu}$ und T_{ag} nach folgenden Formeln berechnet werden können:

$$T_{a\mu} = \frac{c_w G_w + c_m G_m}{g_o G_o} \quad (10)$$

mit: c_w und c_m = spezifische Wärme für Wasser bzw. Metall des inneren Kreislaufs; G_w und G_m = Masse des Wassers und des Metalls, die am Kreislauf beteiligt sind; g_o = fixierter Wert der Reglerkoordinate

und

$$T_{ag} = \frac{c_w G_w + c_m G_m}{g_{end} G_o} \quad (11)$$

mit g_{end} = Endwert (bei sprunghafter Versetzung) der Reglerkoordinate. Hierbei ist der in die Formeln (10) und (11) eingehende Wert für G_m verschieden.

Außerdem ist festgestellt worden, daß für die Reglerleitung II die Verzögerungszeit der Geschwindigkeit τ_g von wesentlicher Bedeutung ist.

Die Übertragungsfunktionen des Kühlsystems müssen demnach in folgender Form angenommen werden:

$$W_{o\mu}(P) = \frac{K_{o\mu}}{T_{a\mu} P + 1} \quad \text{und} \quad W_{og}(P) = \frac{K_{og} \cdot e^{-P \tau_g}}{T_{ag} P + 1} \quad (12)$$

Besonderheiten der Dynamik der Wärmeregler

Die Dynamik der Wärmeregler kann in Abhängigkeit von ihrer Konstruktion durch Gleichungen der ersten (nicht ferngesteuert, direkt wirkend), der zweiten (mit Fernsteuerung, direkt wirkend, ohne Berücksichtigung der Massen) oder der dritten Ordnung (indirekt wirkend, mit Berücksichtigung der Massen) beschrieben werden.

Weite Verbreitung haben bisher die Wärmeregler mit direkter Wirkung - die Dampf-Flüssigkeits- und die Flüssigkeitsregler - erfahren.

Die Übertragungsfunktionen solcher Wärmeregler haben folgendes Aussehen:

$$W_R(P) = \frac{K_R}{T_{aR} P + 1}$$

oder

$$W_R(P) = \frac{K_R}{T_1^2 P^2 + T_2 P + 1} \quad (13)$$

Besonderheiten der Dynamik der Wärmeregulierungssysteme

Eine Besonderheit des "SART"-Systems ist die Übertragungsverzögerung. Wie es die Analyse zeigt, liegt bei praktisch vorkommenden Werten des gesamten Übertragungsfaktors des Systems ($K_{reg} = K_{og} \cdot K_R$) keine Gefahr vor, daß instabile Übergangsvorgänge auftreten. Die Möglichkeit des Auftretens von Schwingungsvorgängen liegt jedoch vor.

Die Stabilitätsschaubilder (Bild 9) zeigen, daß die Zone der aperiodischen Bewegung eine sehr niedrige Grenze aufweist (K_{kp1}) und in sehr starkem Maße von der Beziehung $\beta = \frac{T_{aR}}{T_{ag}}$ abhängig ist.

Die Grenzen der aperiodischen (K_{kp1}) und der allgemeinen Stabilität liegen um so höher, je kleiner α ist, d.h. je kleiner $\frac{T_g}{T_{ag}}$ sein wird.

Untersuchungen zeigen, daß bei Durchflußmengen des Kühlwassers im Kreislauf mit etwa 0,5 ... 0,8 l/PSH die Zeitabschnitte T_g und T_{ag} in günstigem Verhältnis zueinander liegen können.

Bei der Untersuchung der Qualität des Übertragungsvorganges in den betreffenden Systemen fällt die Gefahr des Auftretens einer erheblichen Übersteuerung der Regelung auf.

Die Funktion des Regelungsverlaufs kann aus folgender Formel abgeleitet werden:

$$J_R(t) = \frac{W_o \mu(P)}{1 + W(P)} \mu \quad (14)$$

Hierin ist: $W(P) = W_{og}(P) \cdot W_R(P)$.

Beim Vorliegen komplexer Wurzeln ergibt sich folgende Form:

$$J_r(t) = A_1 + A_2 e^{-\frac{t}{T_{a\mu}}} + A e^{-\varphi_0 t} \cos(\omega t - \nu).$$

Ohne eine ausführliche Analyse der Funktion vorzunehmen, soll die besondere Bedeutung ihrer zweiten Komponente hervorgehoben werden. Die Bedeutung des Koeffizienten A_2 ist folgende:

$$A_2 = - \frac{1}{1 + \frac{K e^{\alpha}}{T_{a\mu}} \left(1 - \frac{T_{ag}}{T_{a\mu}}\right) \left(1 - \frac{T_R}{T_{a\mu}}\right)} \quad (15)$$

Wenn die Beziehung $\frac{T_{ag}}{T_{a\mu}} > 1$ beträgt, wird der Regelungsvorgang mit Übersteuerung der Regelung verlaufen. Versuche bestätigen die Tatsache, daß mit kleinerem $T_{a\mu}$ (Hochleistungsmotoren) die Größe der Übersteuerung zunimmt. Hier ist es besonders wichtig, kleine Werte für die Größe T_{ag} zu haben, d.h. die Zirkulation muß bei einem geringen spezifischen Wärmeaustausch des Kühlsystems um ein Vielfaches erhöht werden.

Für die Verbesserung der Dynamik des Kühlsystems ist demnach folgendes besonders wichtig:

1. Verkürzung der Verzögerungszeit
2. Erhöhung der Zirkulation um ein Vielfaches

Ein bequem anzuwendender Parameter, nach dem schon vorher beurteilt werden kann, ob die Arbeit des Kühlsystems relativ günstig verlaufen wird, ist das Temperaturgefälle im Dieselmotor:

$$t_m = t_{\text{austr}} - t_{\text{eintr}}.$$

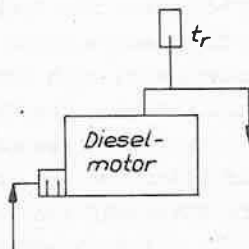
Wenn diese Größe im Bereich von $\Delta t_{\text{rxx}}^0 = 3 \dots 5$ grd und die Größe $\Delta t_{r100} = 10 \dots 15$ grd liegt, haben die Größen T_r , T_{ag} und $T_{a\mu}$ ein relativ günstiges Verhältnis zueinander.

Schlußwort

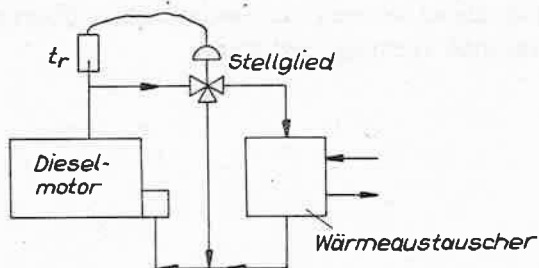
Im vorliegenden Beitrag wurden die Besonderheiten der Statik und der Dynamik der "SART"-Systeme für Dieselmotoren behandelt. Eine Berücksichtigung der hier dargelegten Erkenntnisse bei der Projektierung solcher Systeme wird auch ihre betriebliche Wirksamkeit erhöhen. Unbedingt ist es notwendig, daß die theoretischen Grundlagen vor der praktischen Anwendung solcher Systeme beherrscht werden. Es muß betont werden, daß ihre ungenügende Berücksichtigung bzw. ihre Unterschätzung zu einer Vergeudung von Zeit und Mitteln führt, die dann aufgewendet werden müssen, wenn es gilt, durch empirische Versuche die beste Wirkung bei der Regelung zu erzielen.

Der Darlegung solcher theoretischer Grundlagen und der Erfahrung bei ihrer Nutzung im sowjetischen Dieselmotorenbau ist der vorliegende Vortrag gewidmet.

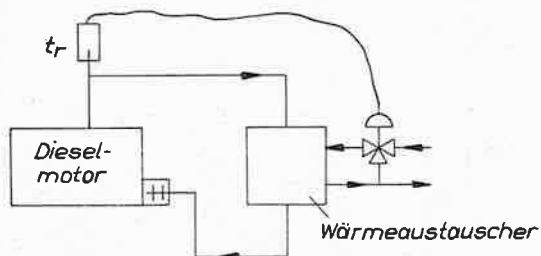
Bild 1: Verfahren zur Regelung der Kühlwassertemperatur



a) Drosselungsverfahren



b) Überlaufverfahren



c) Umleitungsverfahren

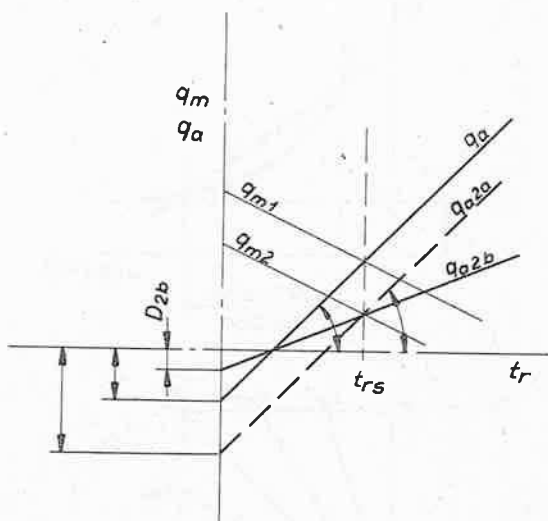


Bild 2: Kenngrößen für die Zuführung und Ableitung der Wärme

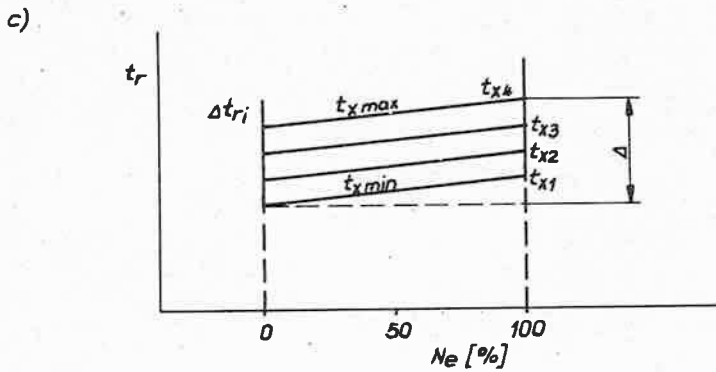
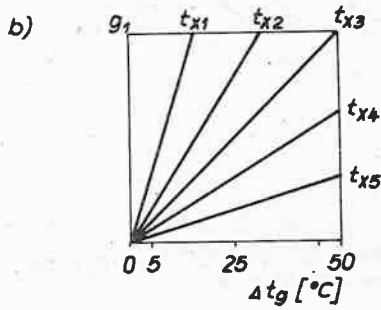
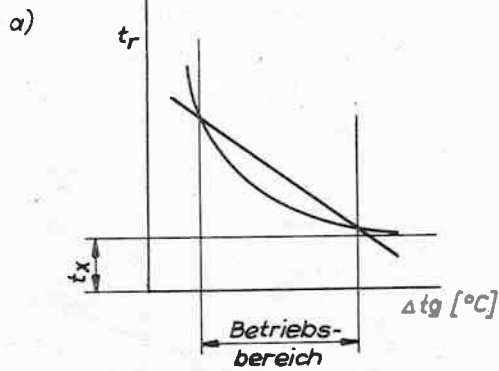
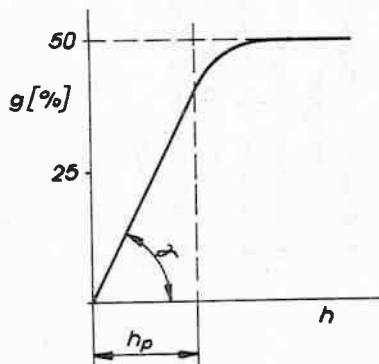
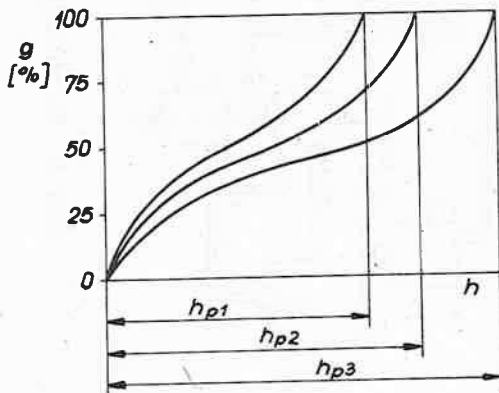


Bild 3 a...c: Regelkennlinien von Kühlwassertemperaturen

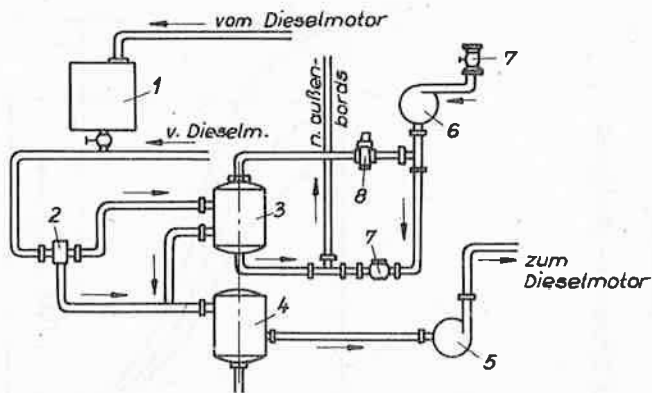
Bild 4: Statische Kennlinien des Stellgliedes



a) Einventil - Stellglied



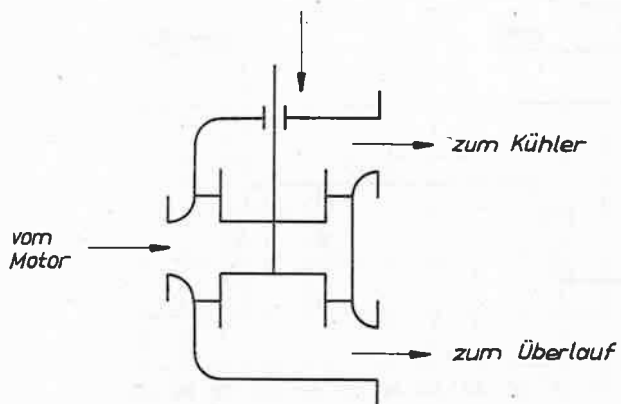
b) Zweiventil - Stellglied



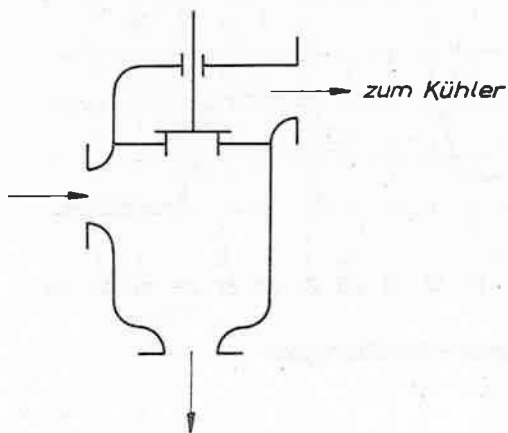
- 1 Entspannungsgefäß
- 2 Wärmeregler
- 3 Wasser - Wasser - Kühler
- 4 Wasser - Öl - Kühler
- 5 Frischwasserpumpe
- 6 Außenbordwasserpumpe
- 7,8 Ventile

Bild 5: Durchflußschema eines geschlossenen Kühlsystems

Bild 6

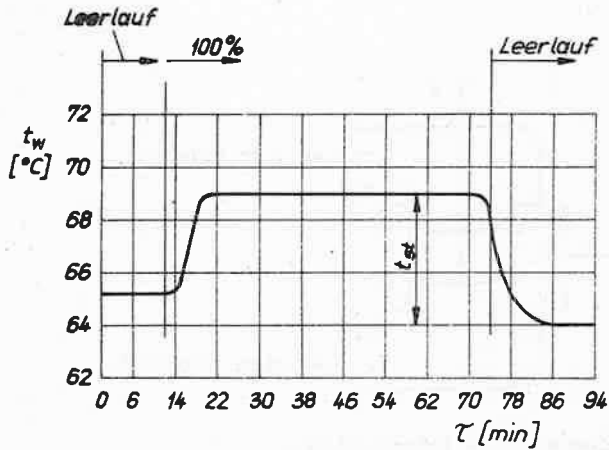


a) Zweiventil - Wärmeregler

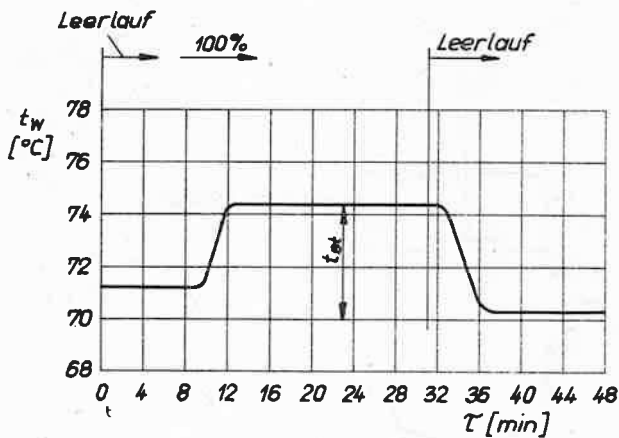


b) Inventil - Wärmeregler

Bild 7: Kennlinien des Wärmereglers

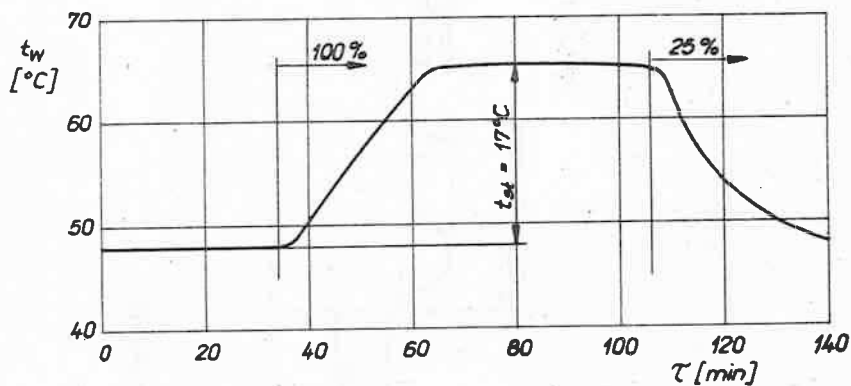


a) Zweiventil - Wärmeregler

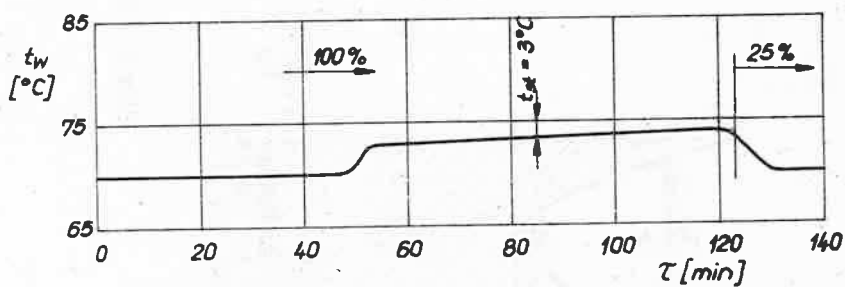


b) Einventil - Wärmeregler

Bild 8: Kennlinien des Wärmereglers



a) Zweiventil - Wärmeregler



b) Einventil - Wärmeregler

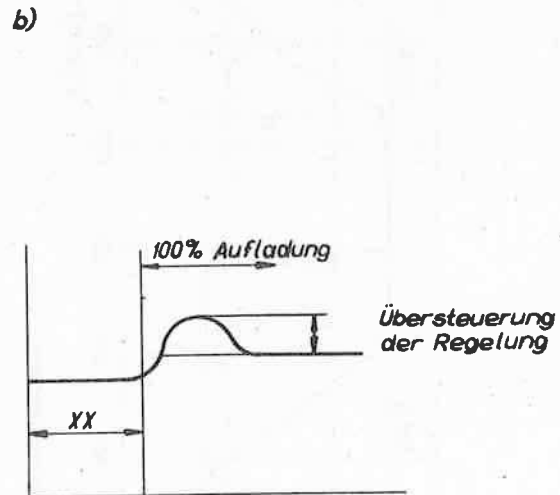
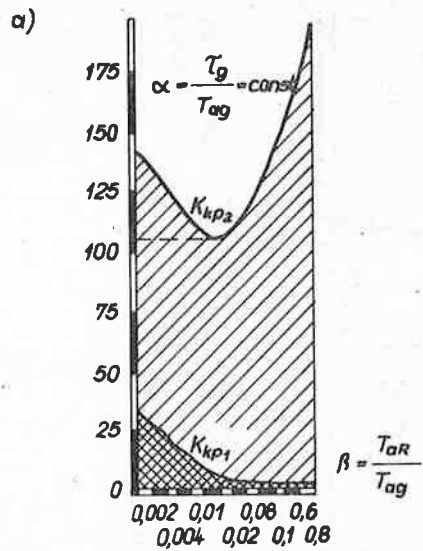


Bild 9 : Stabilitätsschaubilder